

انجمن مهندسی روسازی ایران   انجمن بتن ایران

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



ارزیابی تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی جداسازی شده با استفاده از تحلیل زمان دوام*

مقاله پژوهشی

میلاد زربیلی نژاد(۱)   امین قلی‌زاد(۲) 

DOI: 10.22067/jfcei.2023.80516.1208

چکیده *جداسازها و میراگرها، ابزارهای اتلاف انرژی برای کنترل و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها تحت زمین‌لرزه‌های شدید محسوب می‌شوند. جداساز هسته سربی (LRB) و میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) دو نمونه از متداولترین این ابزارها هستند. مطالعه رفتار غیرخطی و خواص لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای مجهز به این نوع جداسازها و میراگرها می‌تواند کمک قابل‌توجهی به درک رفتار این سیستم‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از زمین‌لرزه‌های بزرگ نماید. در این پژوهش سازه فولادی ۹ طبقه طراحی شده، با استفاده از روش زمان دوام در حالت‌های با پایه ثابت و جداسازی شده به همراه میراگر با نسبت‌های جرمی مختلف و بدون میراگر جرمی در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شده است. نتایج تحلیل‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد که وجود میراگر جرمی تنظیم شونده در کاهش میزان جابه‌جایی تراز جداساز، نسبت جابه‌جایی نسبی و نیروی برش طبقات بسیار مؤثر هست که با افزایش نسبت جرمی میراگر، این اثر بیشتر می‌گردد. ولی در کاهش پاسخ شتاب مطلق سازه مؤثر نبوده و با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی از کارایی سامانه کنترلی در بهبود پاسخ شتاب نسبت به حالت جداساز تنها کاسته می‌شود.*

واژه‌های کلیدی جداساز لاستیکی هسته سربی، میراگر جرمی تنظیم شونده، تحلیل زمان دوام، سازه فولادی.

Assessment of the effect of the tuned mass damper on the seismic performance of isolated steel structures by using endurance time analysis

Milad Zarbilinezhad   Amin Gholizad

Abstract *Isolators and dampers are devices that dissipate energy and reduce the seismic response of structures during strong earthquakes. Lead Rubber Bearings (LRBs) and Tuned Mass Dampers (TMDs) are two common types of these devices. Studying non-linear behavior and seismic properties of structural systems equipped with this type of isolators and dampers can significantly enhance understanding of their behavior against lateral forces caused by strong earthquakes. In this study, a 9-story steel structure was analyzed using the Endurance Time Analysis (ETA) method in SAP2000 software with fixed and isolated bases, along with a tuned mass damper with different mass ratios and without a tuned mass damper. The analysis results indicate that the tuned mass damper is highly effective in reducing the displacement of the isolator level, drift ratio, and story shear forces. This effect is more significant with higher mass ratios of the TMD. This effect is more pronounced with higher mass ratios of the TMD. However, reducing the absolute acceleration response of the structure has not been effective, and increasing the mass ratio of the TMD only reduces the performance of the control system in improving the absolute acceleration response compared to the isolated state*.

Keywords Lead Rubber Bearing, Tuned Mass Damper, Endurance Time Analysis, Steel structure.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۳/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۲) نویسنده مسئول : استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

Email: gholizad@uma.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش ایمنی ساختمان‌ها، با پیشرفت فناوری، اهمیت زیادی پیدا کرده است. از آنجایی که تجهیزات گران‌قیمت و حساس در ساختمان‌های امروزی، برای امور آموزشی، پزشکی، بازرگانی و خدماتی موجود است که از اهمیت زیادی در عملکرد مناسب جامعه و زندگی مردم برخوردار است؛ از این رو ساختمان‌ها غالبا نسبت به تجهیزات موجود ارزش کمتری دارند. یکی از راهکارهای پیشنهادی جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل لرزه‌ای می‌باشد. روش‌های کنترل ارتعاش سازه‌ها، شامل روش کنترل غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی می‌باشد. در روش‌های کنترل غیرفعال، ابزار کنترل‌کننده ارتعاش، در محل مناسبی از سازه قرار می‌گیرد و تا قبل از تحریک سازه، به‌صورت غیرفعال باقی می‌ماند. با شروع تحریک (باد، زلزله و...)، ابزار کنترلی، عملکرد کنترلی خود را انجام می‌دهد و پس از پایان یافتن تحریک، مجددا به حالت غیرفعال باز می‌گردد. میراگرهای ویسکوالاستیک (Viscoelastic Damper(VED))، میراگرهای اصطکاکی (Friction Dampers)، میراگرهای جرمی تنظیم شونده (Tunned Mass Damper(TMD))، جداسازهای لاستیکی (Elastomeric Isolators) و جداسازهای اصطکاکی (Friction Isolators) نمونه‌هایی از ابزارهای کنترلی غیرفعال می‌باشند [1-3].

در سال ۱۹۰۹، فرام [4] برای اولین‌بار، ایده اصلی میراگرهای جرمی تنظیم شونده به‌عنوان یک سامانه میراگر برای کاهش حرکات نوسانی کشتی‌ها، مطرح نمود. در همین راستا در ادامه کارهای فرام، این سامانه، مورد توجه محققان قرار گرفت و چندین محقق، این سامانه را جهت کنترل ارتعاشات مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۹۲۸، اورموندروید و دن هارتوگ [5,6] به ارائه مدل کاملتر از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده پرداختند. نتیجه این مطالعه نشان داد که اضافه کردن میرایی به میراگر جرمی تنظیم شونده، باعث افزایش بازده آن می‌شود [7]. در سال ۱۹۸۲ واربرتون [8] جهت حل مسئله کنترل تحریکات و به دست آوردن پاسخ‌ها، از روش‌های دیگری استفاده کرد. با به کار گرفتن این روش‌ها، واربرتون توانست روابطی را به دست آورد که در مسائل چند درجه آزادی قابل استفاده باشد. در سال ۱۹۹۳، تسای و لین [9] به مطالعه بر روی سیستم‌های چند درجه آزادی مجهز به سامانه میراگر جرمی تنظیم‌شونده پرداختند. آنها در این مطالعه، برای سیستم‌های چند درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شونده روش‌های حل به صورت کلاسیک به دست آوردند و همچنین جهت یافتن پارامترهای بهینه این میراگر، منحنی‌هایی را نیز ارائه دادند. در مطالعه‌ای که چنگ [10] در سال ۱۹۹۹ بر روی سیستم تک درجه آزدی مجهز به جرمی تنظیم‌شونده تحت اثر نیروی زلزله و باد انجام داد، نشان داد که میراگر جرمی تنظیم شونده در کاهش پاسخ سازه تحت اثر نیروی زلزله و باد کارآمد است. همچنین روابطی را برای جهت حل مسئله کنترل تحریکات تحت نیروی زلزله و باد پیشنهاد نمود. از طرفی محققان دیگری از جمله کانیا و همکاران [11] وگوپتا [12] عکس این موضوع را نشان دادند. آنها نشان دادند، استفاده از میراگر جرمی تنظیم-شونده در کاهش پاسخ سازه تحت اثر نیروی زلزله کارآمد نیست که ویلارد و همکاران [13] در سال ۱۹۹۴دلایلی را برای تفاوت این تحقیقات که نشان‌دهنده عدم کارایی سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده در زلزله بود را پیشنهاد کردند. در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که دلیل عدم کارایی سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده در بعضی تحقیقات، بهینه نکردن درست پارامترهای این میراگر می‌باشد. نتیجه این مطالعه نشان داد که جهت کارایی درست سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده، فرکانس میراگر باید در نزدیکی فرکانس مود اصلی سازه تنظیم شود.

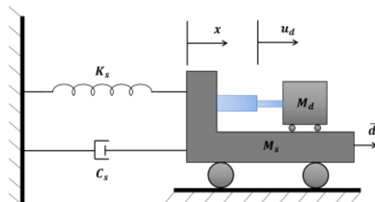
تی پینکاو و همکاران [14] در سال ۲۰۰۲ کارایی میراگر جرمی تنظیم‌شونده را در کاهش میزان خرابی‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با وجود عدم کاهش قابل توجه در تغییرمکان حداکثر سازه، مقاومت سازه در برابر تخریب افزایش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۱۵، ناطقی [15] اثر میراگر جرمی تنظیم‌شونده بر روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی با عدم قطعیت در خصوصیات سازه‌ای را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که برای زلزله‌های دور از گسل با دوره تناوب میانگین پایین، احتمال وقوع خرابی در سازه مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده کمتر از سازه اصلی است و تأثیر استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده با مشخصات مختلف در طبقات مختلف سازه متفاوت است. باتو و آدیکاری [16] در سال ۲۰۱۹ با بررسی پارامترهای مطلوب در

میراگرهای جرمی به این نتیجه رسیدند که استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده ویسکوالاستیک، امکان جذب لرزش عالی در مقایسه با میراگر جرمی تنظیم شده معادل به‌صورت معکوس را دارد. وان تیل و همکاران [17] در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی به مدل‌سازی دامنه فرکانس غیرخطی برای میراگرهای جرمی تنظیم شونده تحت تحریک تک و چندگانه هارمونیک پرداختند و دریافتند که میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه (Bi-directional Tuned Mass Damper(BTMD)، یک استراتژی کنترل لرزشی مؤثر هست که می‌توانند از طریق گزینه‌های مختلف میرایی اجرا شوند و دو مکانیسم اصطکاک همگن و تماسی، نمونه‌های رضایت‌بخشی برای ایجاد دامنه مستقل در سامانه‌های پاندولی می‌باشند. در سال ۲۰۲۰، استانیکزای و همکاران [18] در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی مجهز به سامانه جداساز پایه و میراگر جرمی تنظیم شده پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، کارایی میراگر جرمی تنظیم‌شونده با افزایش دوره تناوب سامانه جداساز (کاهش سختی سامانه جداساز)، کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۲، وانگ و همکاران [19] در مطالعه‌ای به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه مجهز به سامانه جداساز همراه با سامانه میراگر تنظیم-شونده نیمه‌فعال پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از سامانه میراگر تنظیم‌شونده نیمه‌فعال همراه با سامانه جداساز، پاسخ شتاب و جابه‌جایی تراز سامانه جداساز را در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بهبود می‌بخشد.

در این پژوهش، یک سازه ۹ طبقه قاب خمشی ویژه فولادی بدون سامانه جداساز، جداسازی شده و سامانه‌های جداسازی شده با میراگرهای جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و با استفاده از روش زمان دوام به‌صورت غیرخطی تحلیل و پاسخ‌های حاصل از تحلیل ارائه شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله برش پایه، جابه‌جایی، دریفت و شتاب طبقات و همچنین، اثر افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شونده بر منحنی‌های هیسترزیس، اتلاف انرژی هیسترزیس و نیروی برشی به وجود آمده در سامانه جداساز به دست آورده شده و مقایسه‌های لازم صورت پذیرفته است تا میزان تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده در بهبود و برطرف‌کردن رفتار نامناسب سامانه جداساز بررسی شود.

مبانی میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD)

یک سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده، ابزاری متشکل از جرم، فنر و میراگر است که به سازه متصل شده و با تطبیق بسامد خود با بسامد سازه، در فاز مخالف حرکت سازه ارتعاش می‌کند و با اعمال نیروی اینرسی بر سازه، فرکانس تحریک را مستهلک کرده و باعث کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌شود. در این نوع از میراگرها، فنر بین تکیه‌گاه ثابت قائم و جرمی که بر روی تکیه‌گاه‌های غلتکی قرار دارد، قرار می‌گیرد (شکل ۱). معمولا این نوع از میراگرها در تراز طبقات بالا قرار می‌گیرند و با اعمال تحریک به سازه و تجاوز از شتاب مشخص که در طراحی میراگر در نظر گرفته می‌شود، عملکرد کنترلی خود را انجام می‌دهد و پس از پایان‌یافتن تحریک، مجددا به حالت غیرفعال باز می‌گردد. معمولا جنس جرم این سامانه از سرب، بتن یا فولاد است و به‌صورت مجموعه‌ای یا تک به ابعاد ۵ تا ۱۰ متر و به شکل مستطیل یا مربع ساخته و در تراز طبقات بالایی سازه نصب می‌شوند [20].



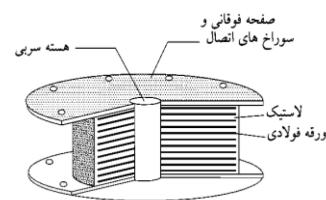
شکل ۱ نمایش شماتیک از نحوه عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده [21]

مبانی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای

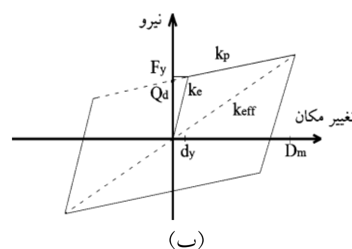
جداساز لرزه‌ای یکی از مؤثرترین روش‌ها، برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، در زمان رخداد زلزله می‌باشد که با جداکردن کردن کل یا بخشی از سازه از قسمت‌های دیگر سازه یا زمین انجام می‌شود. در این روش، با به وجود آمدن تغییرشکل‌های بزرگ، در خود سامانه جداساز، زمان تناوب کلی سازه افزایش می‌یابد که این امر موجب کاهش نیروهای زلزله وارد بر اجزای سازه و نیز تغییرمکان نسبی آن می‌شود. همچنین با فراهم نمودن میرایی لازم از طریق سامانه‌های جداساز لرزه‌ای، نه‌تنها، نیاز سازه کم می‌شود؛ بلکه ظرفیت سازه نیز افزایش می‌یابد. در عین حال، افزایش میرایی، نیروی منتقل شده به سازه را نیز افزایش می‌دهد که این نکته باید در طراحی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای رعایت شود [22,23]. جداسازهای لرزه‌ای به طور کلی به دو

دسته جداسازهای اصطکاکی و جداسازهای لاستیکی تقسیم‌بندی می‌شود که در ادامه توضیح مختصری در مورد یک نمونه از سامانه‌های جداساز لاستیکی که متداولترین سامانه جداسازی لاستیکی است و در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، داده می‌شود.

سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی، از جداسازهای لاستیکی به شمار می‌رود که از چند لایه ورقه‌ای شامل لایه‌های فولادی و لاستیکی که به صورت یک در میان قرار می‌گیرند و یک یا چند سوراخ دایره‌ای شکل که محل قرارگیری هسته‌های سربی هستند و همچنین دو ورق فوقانی و تحتانی تشکیل می‌شوند. دلیل انتخاب سرب برای این نوع از سامانه جداساز، ویژگی ساختمان کریستالی سرب می‌باشد که تحت بارهای ارتعاشی دینامیکی جانبی، تسلیم‌های متوالی در هسته سربی اتفاق می‌افتد، باعث ایجاد پدیده خستگی نشود (شکل۲-الف). این جداساز در زمینه کنترل توأم لرزه‌های شدید و خفیف، به دلیل داشتن رفتار دوخطی با نرم‌شدگی تحت بارهای نسبتا شدید لرزه‌ای، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده‌اند. سختی اولیه این سامانه جداساز شامل سختی بخش سربی و بخش لاستیکی هست که سختی بخش لاستیکی در مقایسه با سختی بخش سربی بسیار اندک است (شکل۲-ب).



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف) شکل شماتیک اجزای جداساز لاستیکی هسته سربی ب) رفتارغیر خطی جداساز لاستیکی با هسته سربی [24]

معرفی روش زمان دوام

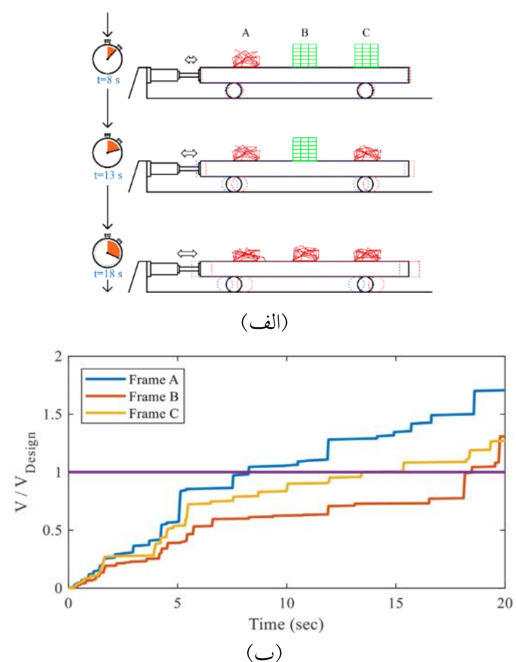
ایده اولیه روش زمان دوام برای اولین‌بار توسط استکانچی و همکاران در سال ۲۰۰۴ ارائه شد [25]. در این روش، سازه‌ها تحت یک تابع شتاب فزاینده کالیبره شده قرار می‌گیرند و عملکرد آنها در طول زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا، واژه تابع شتاب (Accelerogram Function) به‌کاررفته است تا با مفهوم شتاب‌نگاشت، چه مصنوعی و چه طبیعی، اشتباه گرفته نشود [26]. مفهوم روش زمان دوام با استفاده از یک آزمایش فرضی توضیح داده می‌شود. این آزمایش به این صورت است که سه سازه مختلف با خصوصیات نامشخص بر روی میز لرزان، تحت ارتعاش تصادفی که شدت آن به‌تدریج افزایش پیدا می‌کند، در نظر گرفته می‌شود (شکل). در شروع آزمایش، هنگامی‌که دامنه ارتعاشات کم است، هر سه سازه پایدار خواهند بود. با گذشت زمان و افزایش شدت تحریک، گسیختگی‌های سازه‌ای توسعه یافته و در صورتی که سطح شدت تحریک از سطح ظرفیت سازه فراتر رود، فروریزش رخ می‌دهد. حال با فرض این که با گذشت زمان و افزایش شدت تحریک ابتدا سازه «A»، سپس سازه «C» و در نهایت سازه «B» تخریب شود، نتیجه گرفته می‌شود، سازه «A» که نسبت به تحریک دینامیکی اعمال شده کمترین زمان دوام را داشته، ضعیفترین عملکرد و سازه «B» که مدت طولانیتری دوام آورده، بهترین عملکرد را دارد. تفاوت در زمان‌های دوام در این سازه‌ها، می‌تواند به طور نسبی بیانگر ریسک لرزه‌ای آنها در فروریزش، تحت رخدادهای زلزله باشد. در نتیجه با استفاده از مفاهیم ساده فوق، روش زمان دوام به‌عنوان یک ابزار تحلیلی کاربردی، مسیر را برای ارزیابی لرزه‌ای و طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد هموار می‌کند. نکته حائز اهمیت این است که نتیجه‌گیری بالا صرفا با مشاهده رفتار دینامیکی سازه‌ها به دست آمده است و هیچ نیازی به دانستن مشخصات دینامیکی سازه‌ها پیش از انجام آنالیز وجود ندارد. البته همین خصوصیات دینامیکی هستند که زمان دوام سازه را تعیین می‌کنند؛ اما در آزمایش ملاک برتری زمان دوام می‌باشد [25].

همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش فرضی در قالب منحنی پاسخ سازه مقابل شدت زلزله رسم شده است. در این نمودار، محور افقی، زمان را از ابتدای اعمال بارگذاری، و محور قائم در هر زمان برابر پاسخ حداکثر مطلق مقادیر پارامتر مورد نظر سازه، از شروع تا زمان مورد نظر می‌باشد. این مقدار با استفاده از رابطه (۱) به دست آورده

می‌شود. از آنجایی که بارگذاری در طول زمان به تدریج افزایش می‌یابد، در این آزمایش، زمان می‌تواند معرف شدت بارگذاری باشد. در عمل، زمان به‌آسانی قابل نگاشت به شاخص‌های شدت زلزله، نظیر شتاب بیشینه زمین (PGA)، شتاب طیفی (S_a)، دوره بازگشت و سایر شاخص‌های شدت مورد نظر می‌باشد.

$$\Omega\,(f(t)) = Max(|f(\tau)|)0 \leq \tau \leq t \qquad (۱)$$

در رابطه فوق «Ω» مقدار حداکثر پاسخ تا زمان «t» و «f» تاریخچه پاسخ می‌باشد. پارامتر پاسخ مورد نظر، می‌تواند شامل پاسخ‌های ساده نظیر تغییرمکان نیرو، تنش و یا شاخص‌های پیچیده‌تر نظیر دوران خمیری، شاخص‌های خرابی، هزینه‌های خرابی و... باشد.



شکل ۳ الف) آزمایش فرضی قاب‌ها تحت ارتعاش اتفاقی افزاینده و ب) نمودار پاسخ قاب‌ها تحت ارتعاش اتفاقی افزاینده [27]

روش زمان دوام مشابه آنالیز دینامیکی فزاینده بر پایه روش تاریخچه زمانی است، با این تفاوت که ورودی لرزه‌ای مخصوص به خود را دارد که این ورودی لرزه‌ای از آن جهت که مبنایی متفاوت با شتاب‌نگاشت‌های طبیعی و مصنوعی دارد «تابع شتاب» نامیده می‌شود. کاربرد عملی روش زمان دوام نیز منوط به تولید توابع شتاب (توابع تحریک) فزاینده‌ای است که نتایج حاصل از تحلیل با استفاده از آنها منجر به تخمین قابل‌قبولی از آثار ناشی از زلزله در سازه گردد. از بین توابع شتاب زمان دوام که تا به امروز توسعه یافته‌اند، مجموعه توابع شتاب سری in مجموعه‌ای است که طیف هدف آنها در فرایند تولید، طیف حاصل از ۲۰ زلزله واقعی به کار رفته در FEMA440 [28] بوده و برای تحلیل حوزه غیرخطی تهیه شده‌اند. این سری از توابع شتاب زمان دوام به‌گونه‌ای تولید شده که در محدوده غیرخطی پاسخ مناسبتری ارائه می‌کند. به این ترتیب به جای انتخاب ۲۰ شتاب‌نگاشت واقعی زلزله و مقیاس‌سازی آنها، می‌توان از سری شتاب‌نگاشت in زمان دوام استفاده کرده و با حجم محاسبات بسیار کمتری به نتایج مورد نظر دست یافت. از این رو در این پژوهش از سه رکورد ETAinx01-03 استفاده می‌شود.

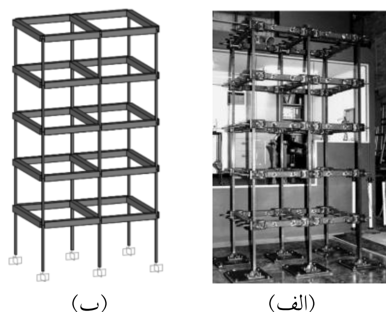
راستی‌آزمایی

جهت راستی‌آزمایی مدل‌سازی و بررسی نتایج نرم‌افزار از مطالعات آزمایشگاهی وو و سمالی [29] که در سال ۲۰۰۲ در آزمایشگاه سیدنی در استرالیا، آزمایش‌های خود را در دو حالت سازه با پایه گیردار و سازه با جداساز انجام داده‌اند، انتخاب شده است. ارتفاع کلی مدل آزمایشگاهی که یک سازه فولادی ۵ طبقه می‌باشد، ۳ متر بوده که هر کدام به ارتفاع یکسان ۶۰۰ میلی‌متر و با ابعاد ۱×۱/۵متر می‌باشد. سیستم سازه‌ای از نوع سیستم قاب خمشی بوده که در یک راستا دارای ۲ دهنه و در سمت دیگر دارای ۱ دهنه می‌باشد. سختی جداسازهای مورد استفاده در این مدل آزمایشگاهی برابر با ۲۱۲ کیلونیوتون بر متر بوده و تیرهای تمامی طبقات به صورت مقاطع توخالی مربعی به ابعاد ۴×۷۵×۷۵ میلی‌متر و سختی جانبی آن توسط ستون‌هایی با مقطع مربعی توپر به ابعاد ۲۵×۲۵ میلی‌متر تأمین می‌شود (شکل ۴).

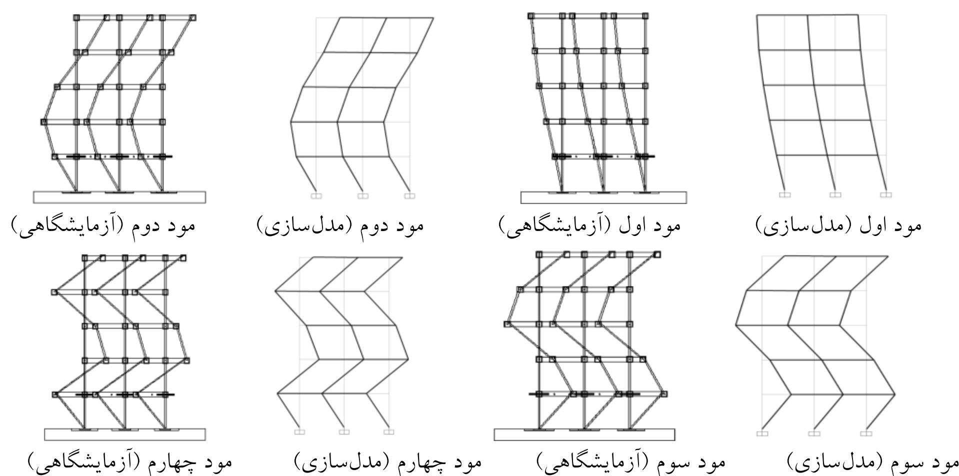
مدل در دو حالت پایه گیردار و جداسازی شده در راستای افقی (در راستای دارای دو دهنه) تحت زلزله نورثریج (Northridge)، قرار گرفته و تحلیل تاریخچه زمانی بر روی آن انجام شده است. نکته مهمی که شایان ذکر است، این است که برای برقراری تشابه دینامیکی، نسبت به حالت واقعی، رکورد مورد استفاده در پژوهش وو و سمالی، در محور زمان با ضریب «$\frac{۱}{۳}$» مقیاس شده است.

ابتدا در شکل (۵) پاسخ مودهای مختلف ارتعاشی سازه فلزی ۵ طبقه حاصل از مدل‌سازی با نتایج گزارش شده توسط وو و سمالی مقایسه شده است. مقایسه اشکال مختلف مودی

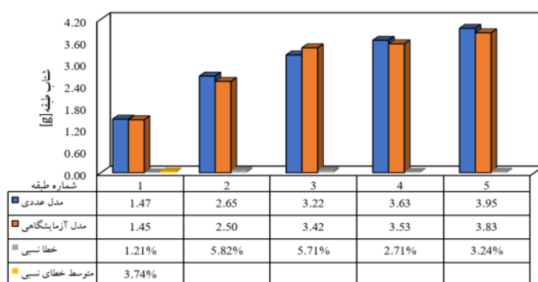
نشان از دقت مناسب مدل‌سازی دارد.



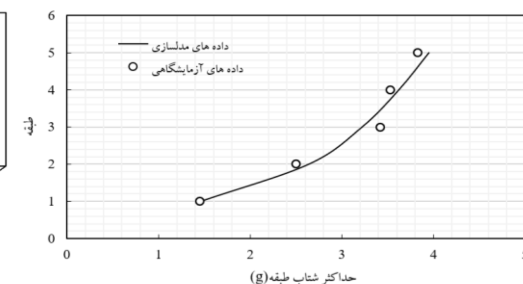
شکل ۴ مدل مبنای ساختمان فلزی ۵ طبقه دانشگاه سیدنی [29]: الف) مدل آزمایشگاهی و ب) مدل عددی در محیط نرم‌افزار



شکل ۵ مقایسه مودهای مختلف ارتعاشی سازه مدل آزمایشگاهی و عددی



شماره طبقه	1	2	3	4	5
مدل عددی	1.47	2.65	3.22	3.63	3.95
مدل آزمایشگاهی	1.45	2.50	3.42	3.53	3.83
خطا نسبی	1.21%	5.82%	5.71%	2.71%	3.24%
متوسط خطای نسبی	3.74%				



شکل ۶ مقایسه حداکثر شتاب طبقات سازه پایه گیردار مدل عددی و آزمایشگاهی

شماره طبقه	1	2	3	4	5
مدل عددی	1.12	1.37	1.64	1.80	1.92
مدل آزمایشگاهی	1.15	1.44	1.67	1.79	1.86
خطای نسبی	2.98%	4.90%	2.03%	0.65%	3.27%
متوسط خطای نسبی	2.77%				

شکل ۷ مقایسه شتاب طبقات سازه جداسازی شده مدل‌سازی شده و آزمایشگاهی

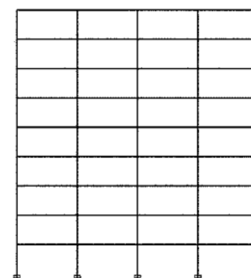
همان‌طور که ملاحظه شد، مقادیر شتاب طبقات حاصل از مدل‌سازی سازه با پای گیردار و جداسازی شده در نرم‌افزار SAP2000، نزدیک به نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی وو و سمالی [29] است که این امر بیانگر تأیید عملکرد نرم‌افزار مذکور و صحت مدل‌سازی انجام شده می‌باشد.

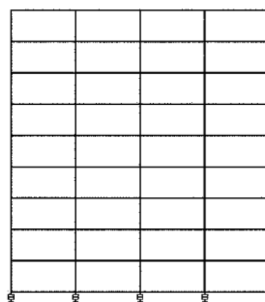
سازه مورد مطالعه

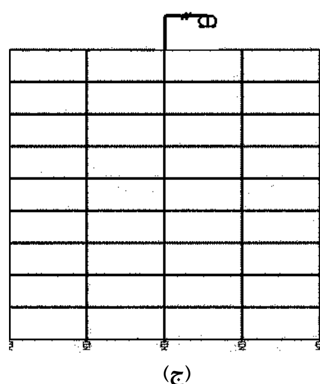
در این مطالعه ساختمان فولادی ۹ طبقه به صورت دو بعدی با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه دارای ۴ دهنه ۶ متری در راستای X است (شکل ۸). محل احداث سازه در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد و سازه در زمینی با خاک تیپ II استاندارد ۲۸۰۰ [30] احداث شده است. سازه دارای کاربری مسکونی است؛ بنابراین طبق استاندارد۲۸۰۰ ویرایش چهارم در دسته ساختمان‌های با اهمیت متوسط قرار می‌گیرد. بار مرده و زنده طبقات به ترتیب ۶۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع با عرض بارگیر ۴ متر در نظر گرفته شده است. در طراحی ستون‌ها و تیرها از مقاطع بال پهن (Wide Flang) (تیرآهن W) استفاده شده است (جدول۲). ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳/۲متر است. کلیه ضوابط «آیین‌نامه طراحی ساختمان در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم)»، «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی(AISC)» [31]. در طراحی سیستم مذکور استفاده شده است و مشخصات مصالح مصرفی برای تیر و ستون از جنس فولاد ST37 می‌باشد. مشخصات توابع شتاب زمان دوام مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۲) آورده شده است. سازه‌های مورد مطالعه همان طور که قبلا ذکر شد، به صورت بدون سامانه جداساز، مجهز به سامانه جداساز LRB و مجهز به سامانه جداساز LRB و TMD با نسبت جرمی ۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪ و ۷٪ درصد مدل‌سازی شده و با استفاده از روش زمان دوام تحلیل می‌شوند.

جدول ۱ مقاطع مورد استفاده در سازه‌های مورد مطالعه

مقطع تیر سازه ۹ طبقه	مقطع ستون سازه ۹ طبقه	طبقه
W18X50	W12X279	۱-۳
W16X50	W12X152	۴-۶
W14X53	W12X120	۷-۹


(الف)


(ب)


(ج)

شکل ۸ سازه ۹ طبقه: الف) بدون سامانه جداساز، ب) مجهز به سامانه جداسازLRB ، ج) مجهز به سامانه جداساز LRB و میراگر TMD

جدول ۲ مشخصات کلی مجموعه توابع تحریک زمان دوام مورد استفاده در این مطالعه

نام مجموعه رکورد	تعداد رکورد	طیف الگوی هدف	طول زمان (ثانیه)	توضیحات
ETA20inx	۳	متوسط طیف ۲۰ رکورد FEMA 440 نوع C، بهینه شده در ناحیه غیرخطی، هر مؤلفه جداگانه	۲۰	مناسب برای مدل‌های خطی، غیرخطی

طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده و جداسازهای لاستیکی با هسته سربی

طراحی جداساز لاستیکی با هسته - سربی (LRB). هر چند با توجه به موقعیت قرارگیری ستون‌ها، سهم ستون‌ها از وزن مؤثر لرزه‌ای ساختمان متفاوت می‌باشد، ولی با توجه به اینکه در این مطالعه، هدف ارزیابی پاسخ سازه‌های مجهز به سامانه جداسازی شده با اضافه نمودن میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف می‌باشد؛ از این رو برای کلیه ستون‌ها در سازه مورد مطالعه، یک تیپ سامانه جداساز طراحی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نوع خاک محل سازه نقش به‌سزایی در طراحی جداساز لرزه‌ای دارد. در این مطالعه نتایج برای ساختمان واقع بر روی خاک نوع II با خطر نسبی خیلی زیاد بررسی و مقایسه‌های لازم انجام می‌شود.

مشخصات زیر برای سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی فرض می‌شود:

- دوره تناوب طبیعی جداسازها (T_D) ۲/۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.
- نسبت میرایی معادل مؤثر برابر (ξ_{eff}) ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است.
- ضریب میرایی (B_D) برای جداساز با نسبت میرایی معادل مؤثر برابر(ξ_{eff}) ۱۵ درصد براساس مفاد دستور العمل طراحی برابر با ۱/۳۵ در نظر گرفته شده است [24].
- تنش تسلیم سرب (f_{py}) برابر با ۸۸۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است.
- حداکثر تغییر شکل نسبی کششی لاستیک در زمان گسیختگی (ε_b) ۵۰۰ درصد در نظر گرفته شده است.
- حداکثر تغییر شکل برشی (γ_{max}) برابر با ۱۵۰ درصد در نظر گرفته شده است.
- مقدار ضریب شکل (S) برابر با ۱۵ در نظر گرفته شده است.

نوع لاستیک به کار رفته در جداساز از نوع IRHD-65 می‌باشد که خصوصیات آن در جدول (۳) آورده شده است.

برای طراحی سامانه جداساز LRB طبق دستور العمل نشریه ۵۲۳ در قدم نخست با توجه به فرضیات انجام‌گرفته مقدار سختی افقی مؤثر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$K_{eff}=\frac{W_{DL+0.25LL}}{g}\times(\frac{2\pi}{T_D})^2 \quad (۱)$$

جدول ۳ مشخصات لاستیک جداساز مورد استفاده [24]

$E(\frac{KN}{m^2})$ مدول یانگ	۵۸۵۰
$G(\frac{KN}{m^2})$ مدول برشی	۱۳۷۰
ضریب اصلاحی k	۰/۵۴

در رابطه (۱) منظور از $W_{DL+0.25LL}$ مقدار کل وزن مؤثر لرزه‌ای سازه است که در این مطالعه وزن مرده به همراه ۲۵ درصد بار زنده ($\alpha=25\%$) به عنوان کل وزن مؤثر لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. در قدم بعدی مقدار تغییرمکان طرح با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$D_D=\frac{g}{4\pi^2}\times\frac{A\times(S+1)T_S^{\frac{2}{3}}\times T_D}{B_D} \quad (۲)$$

حال با محاسبه مقدار تغییرمکان طرح بایستی مقدار نیروی تسلیم اولیه (مقاومت مشخصه) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شود:

$$Q_d\cong\frac{\pi K_{eff}D_D\xi_{eff}}{2} \quad (۳)$$

در قدم بعد، مقدار نیروی تسلیم اولیه (مقاومت مشخصه) مقدار سختی پس از تسلیم (سختی ثانویه) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$K_d=K_{eff}-\frac{Q_d}{D_D} \quad (۴)$$

میزان سختی الاستیک در این مطالعه بر اساس تحقیقات نعیم و کلی [32] برای جداسازهای هسته سربی ۱۰ برابر سختی پس از تسلیم در نظر گرفته می‌شود:

$$K_e\approx 10K_d \quad (۵)$$

با مشخص‌شدن سختی الاستیک (سختی اولیه) و سختی پس از تسلیم (سختی ثانویه) مقدار جابه‌جایی تسلیم با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$D_y=\frac{Q_d}{K_e-K_d} \quad (۶)$$

در نهایت آخرین پارامتر موردنیاز جهت مدل رفتاری، نیروی تسلیم جداساز است که با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$F_y = Q_d + K_d D_y \quad (۷)$$

با استفاده از روابط (۸-۲) مشخصات جداساز به کار رفته در این مطالعه محاسبه شده و به صورت خلاصه مشخصات مدل دوخطی جداساز در جدول (۴) آورده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل کردن سامانه جداساز لاستیکی با هسته سربی از المان لینک (link) از نوع Rubber Isolator استفاده شده است.

طراحی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD). برای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده در مدل سازه‌ای، یکی از اصلیترین پارامترها جرم میراگر می‌باشد. معمولا جرم میراگر به صورت درصدی از جرم کل سازه بیان می‌شود.

$$\mathrm{m}_d = \mu \times M_s \quad (۸)$$

در رابطه (۸) μ نسبت جرمی، m_d جرم میراگر و M_s جرم کل سازه است. نسبت جرمی بین ۱ تا ۲۰ درصد متغیر است [33]. مقدار سختی کل نیز با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$k_d = 4\pi^2 \mu\, \alpha^2 \frac{M_s}{T_s^2} \quad (۹)$$

در رابطه (۹) α نسبت فرکانسی (نسبت فرکانس میراگر جرمی تنظیم شونده به فرکانس مود اول سازه) است که بین ۰/۹ تا ۱ متغیر است [33]. در این مطالعه به جهت این که تنها تأثیر درصد جرمی در بهبود پاسخ سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد، از این رو مقدار ۰/۹۵ برای کلیه مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود و $\mathrm{T_s}$ دوره تناوب مود اول سازه می‌باشد. در ادامه ضریب میرایی کل سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده نیز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$c_d = 4\pi\mu\, \alpha\, \xi \frac{M_s}{T_s} \quad (۱۰)$$

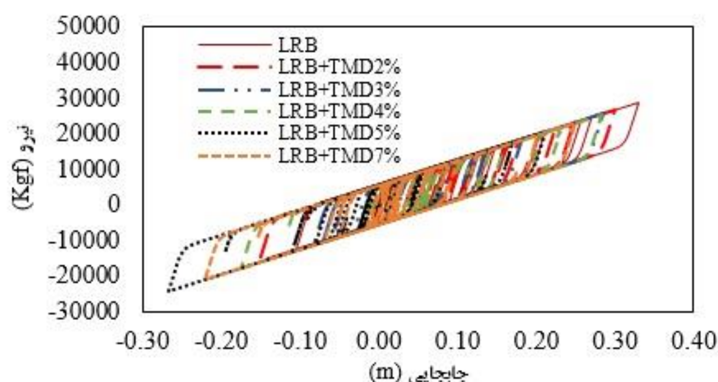
در رابطه (۱۰) ξ نسبت میرایی TMD می‌باشد. مناسبترین نسبت میرایی میراگر بین ۲۰تا ۳۰ درصد می‌باشد که در این مطالعه ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است [33]. در این مطالعه، پنج نسبت جرمی (٪۲، ٪۳، ٪۴، ٪۵ و ٪۷) برای میراگر جرمی تنظیم شونده استفاده شده است که با قرارگیری میراگرها بر روی طبقه آخر، پنج مدل سازه ساختمانی با میراگر جرمی تنظیم شونده مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از روابط (۱۱-۹) مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده به کار رفته در این مطالعه محاسبه شده و به صورت خلاصه در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل کردن میراگر جرمی تنظیم شونده از المان لینک (link) از نوع Linear استفاده شده می‌شود. لینک خطی مورد نظر از یک طرف به یک جرم متمرکز و از طرف دیگر به سازه متصل شده است.

جدول ۴ مشخصات مدل دوخطی جداسازها

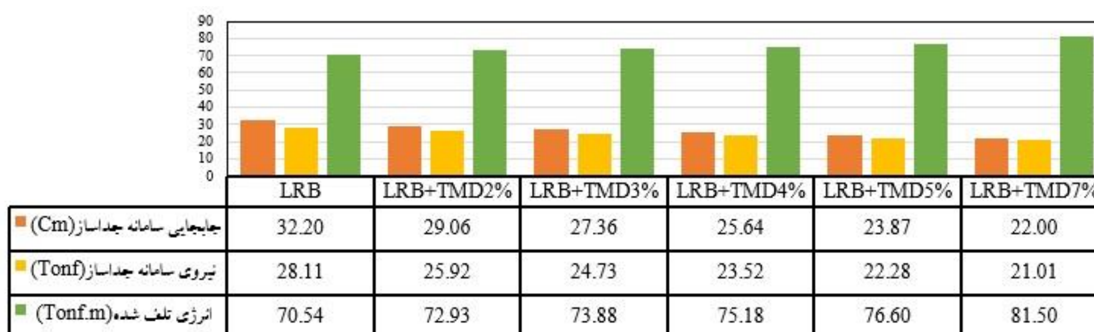
موقعیت قرارگیری جداساز لرزه‌ای	تغییرمکان طرح سامانه جداساز لرزه‌ای $\mathrm{D_D}(cm)$	جابه‌جایی تسلیم $\mathrm{D_y}(mm)$	سختی مؤثر $\mathrm{K_{eff}}\left(\frac{\mathrm{Tonf}}{\mathrm{m}}\right)$	سختی ثانویه $\mathrm{K}_d\left(\frac{\mathrm{Tonf}}{\mathrm{m}}\right)$	سختی اولیه $\mathrm{K_e}\left(\frac{\mathrm{Tonf}}{\mathrm{m}}\right)$	مقاومت مشخصه $\mathrm{Q_d}(\mathrm{Tonf})$
تراز پایه	۳۲/۳۷	۸/۶۹	۹۱/۸۷	۷۰/۲۳	۷۰۲/۲۷	۵/۴۹

جدول ۵ مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده

موقعیت قرارگیری میراگر جرمی تنظیم شونده	نسبت جرمی (٪) $\mu = \frac{\mathrm{m}_d}{M_s}$	جرم میراگر $m_d(kg)$	سختی کل $k_d(\frac{kgf}{m})$	میرایی کل $c_d(\frac{kg.Sec}{m})$
طبقه ۹ (طبقه بام)	۲	۱۴۲۶۸/۷۳	۸۱۳۴۱/۴۹۵۳۳	۲۰۴۴۰/۸۹۶۴۱
	۳	۲۱۴۰۳/۰۹	۱۲۲۰۱۲/۲۴۳	۳۰۶۶۱/۳۴۴۶۲
	۴	۲۸۵۳۷/۴۵	۱۶۲۶۸۲/۹۹۰۷	۴۰۸۸۱/۷۹۲۸۲
	۵	۳۵۶۷۱/۸۲	۲۰۳۳۵۳/۷۳۸۳	۵۱۱۰۲/۲۴۱۰۳
	۷	۴۹۹۴۰/۵۴	۲۸۴۶۹۵/۲۳۳۷	۷۱۵۴۳/۱۳۷۴۴



شکل ۹ نمودارهای هیستریزیس جداساز با نسبت‌های متفاوت جرمی TMD



	LRB	LRB+TMD2%	LRB+TMD3%	LRB+TMD4%	LRB+TMD5%	LRB+TMD7%
جابجایی سامانه جداساز(Cm)	32.20	29.06	27.36	25.64	23.87	22.00
نیروی سامانه جداساز(Tonf)	28.11	25.92	24.73	23.52	22.28	21.01
انرژی تلف شده(Tonf.m)	70.54	72.93	73.88	75.18	76.60	81.50

شکل ۱۰ مقدار تغییرمکان جانبی، نیرو و انرژی تلف شده دریک چرخه سامانه جداساز در سطح MCE به ازای نسبت‌های متفاوت جرمی TMD

نتایج تحلیل مدل‌ها

تأثیر نسبت‌های متفاوت جرمی TMD بر رفتار هیسترزیس جداساز. در این قسمت به چگونگی تأثیر سطوح مختلف نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شونده بر روی رفتار هیسترزیس سامانه جداساز پرداخته می‌شود. عملکرد سامانه‌های جداساز از نظر رفتار هیسترزیس با سه پارامتر یا سه مؤلفه مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند که عبارتند از:

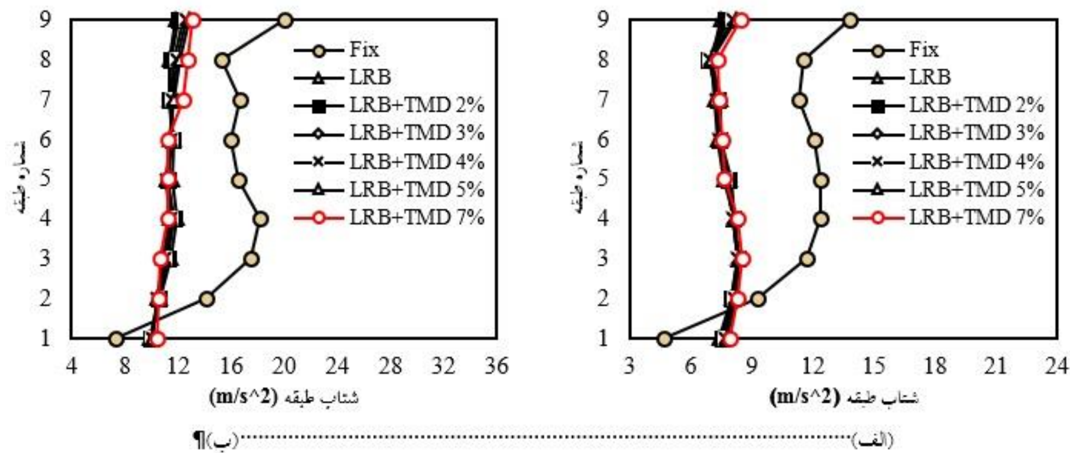
۱- مساحت زیر نمودار حلقه هیسترزیس یا انرژی تلف شده؛

۲- بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده در سطح جداساز؛

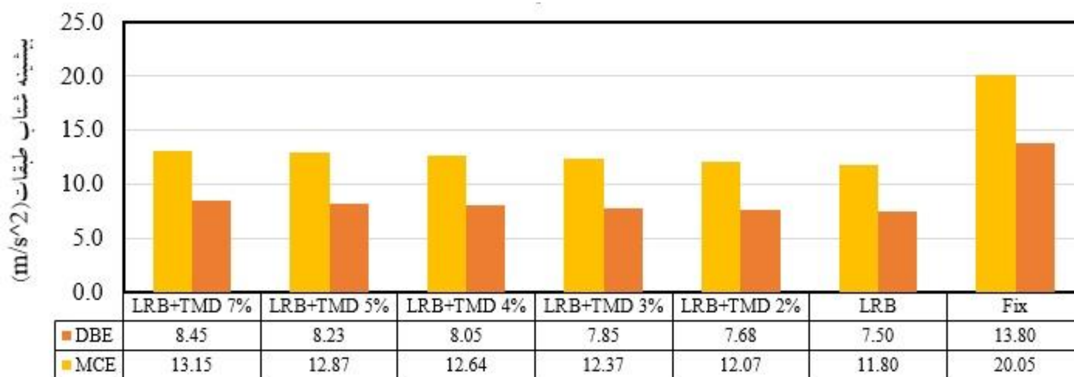
۳- بیشینه نیروی ایجاد شده در سطح جداساز.

تمامی مقادیر مربوط به سه مؤلفه ذکر شده به منظور مقایسه و ارزیابی بهتر در شکل‌های (۱۰ و ۹) خلاصه شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که کارایی جداساز در شدت‌های بالا بهتر مشخص می‌شود، در این بخش تنها در سطح MCE به بررسی مؤلفه‌های ذکر شده پرداخته شده است. همان طور که در شکل‌های (۱۰ و ۹) ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت جرمی سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده تا ۷ درصد، باعث کاهش مقادیر بیشینه جابه‌جایی و نیروی ایجاد شده در سطح جداساز و همچنین افزایش انرژی تلف شده، به ترتیب به میزان ۳۱، ۲۵ و ۱۶ درصد می‌شود که این سه مورد از عوامل مطلوب بر روی رفتار هیسترزیس جداساز است.

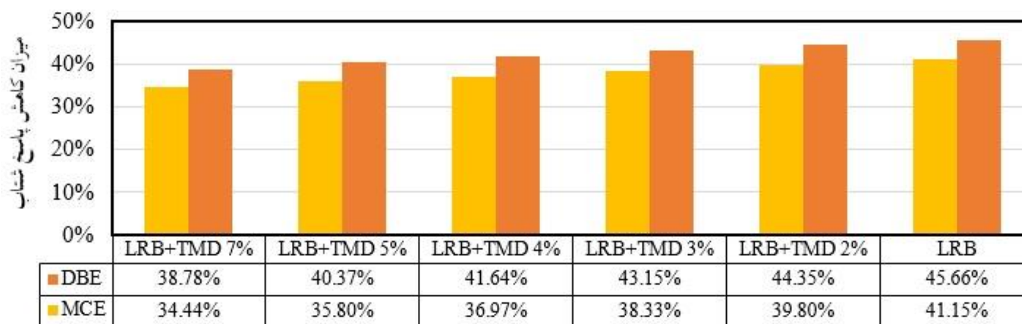
شتاب طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به تشریح نمودارهای شتاب طبقات در سازه کنترل نشده و سازه کنترل شده با سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف پرداخته شده است. همان طور که در نمودار شکل (۱۱) مشهود است، استفاده از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز، نه‌تنها به بهبود پاسخ شتاب سازه کنترل شده کمک نمی‌کند، بلکه با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی، پاسخ بیشینه شتاب طبقه در تراز بام نسبت به حالت جداساز LRB تنها افزایش مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل (۱۳ و ۱۲) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به میزان ۷٪ از ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ شتاب طبقات کاسته می‌شود.



شکل ۱۱ مقایسه شتاب طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های‌جرمی مختلف میراگر جرمی: الف) در زلزله سطح DBE، ب) زلزله‌سطح MCE

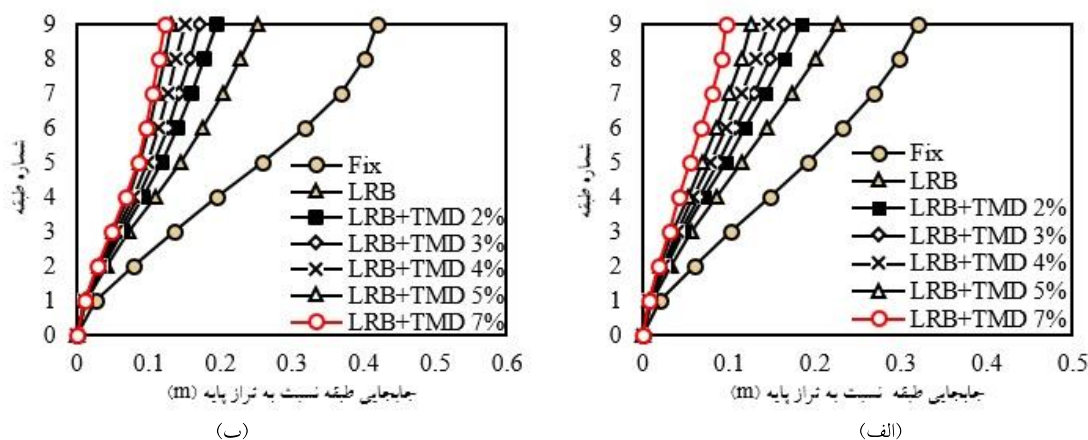


شکل ۱۲ مقایسه شتاب بیشینه طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

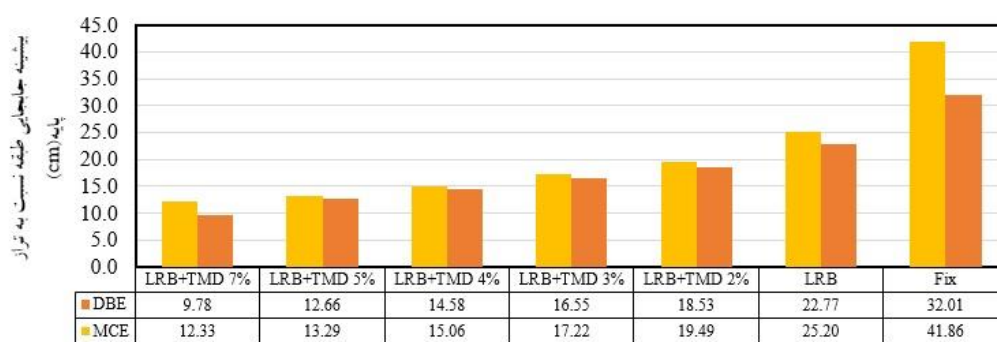


شکل ۱۳ درصد کاهش پاسخ شتاب بیشینه طبقات در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

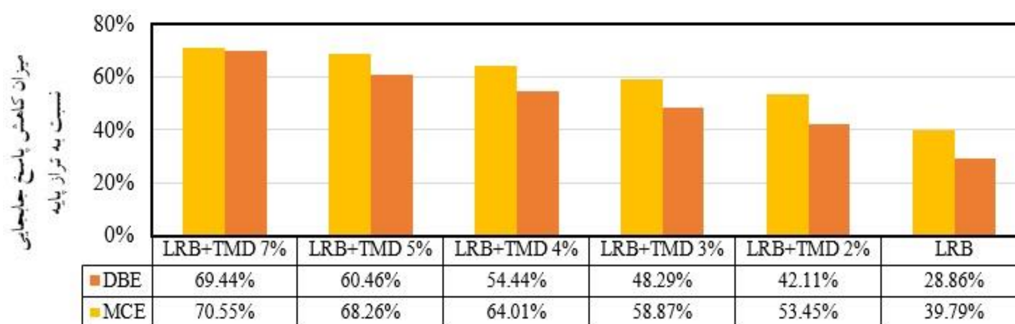
جابه‌جایی طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به مقایسه پاسخ جابه‌جایی طبقات نسبت به تراز پایه در حالت بدون سامانه جداساز با حالت مجهز به سامانه جداساز و حالت مجهز به سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان طور که در نمودار شکل (۱۴) مشهود است، استفاده از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز در تمامی حالت‌ها به بهبود پاسخ جابه‌جایی طبقات نسبت به تراز پایه در سازه کنترل شده کمک می‌کند، که این بهبود پاسخ در جابه‌جایی نسبت به تراز پایه با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تأثیر بیشتری در کاهش پاسخ می‌گذارد. همان طور که در شکل‌های (۱۶و۱۵) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشنه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب به میزان ۴۱٪ و ۳۱٪ به ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ بیشینه جابه‌جایی طبقات (طبقه بام) نسبت به تراز پایه افزوده می‌شود.



شکل ۱۴ مقایسه جابه‌جایی طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های جرمی مختلف میراگر جرمی: الف) در زلزله سطح DBE، ب) زلزله سطح MCE



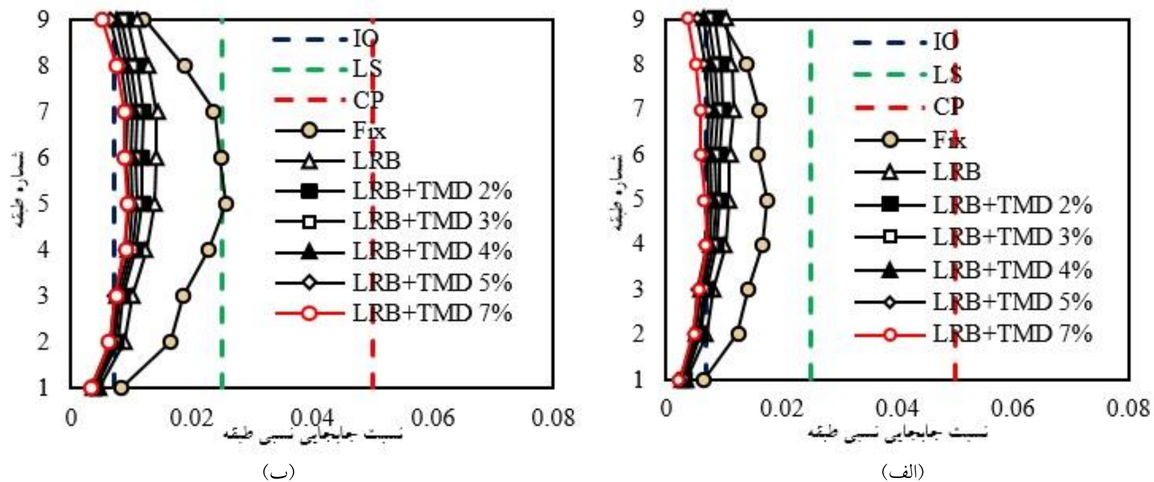
شکل ۱۵ مقایسه جابه‌جایی بیشینه طبقات نسبت به تراز پایه سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف



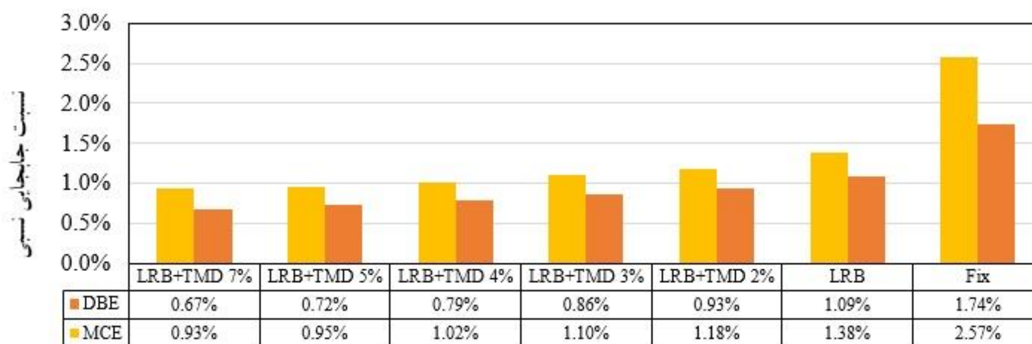
شکل ۱۶ درصد کاهش پاسخ جابه‌جایی بیشینه نسبت به تراز پایه در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به مقایسه پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات در حالت بدون سامانه جداساز با حالت مجهز به سامانه جداساز و حالت مجهز به سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه‌های ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد. وجود جداسازها در سازه باعث می‌شود روسازه در برابر زلزله رفتار صلبی از خودش نشان دهد و این موضوع باعث کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات می‌گردد. با توجه به شکل (۱۷) تغییر مکان جانبی نسبی در حالت کنترل نشده در طبقه پنجم در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب از حد عملکردی سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO(Immediate Occupancy)) و سطح عملکرد ایمنی جانی (Life Safety) LS) تجاوز می‌کند؛ ولی بعد از تجهیز به سامانه کنترلی جداساز لاستیکی هسته سربی تنها و جداساز لاستیکی با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف بهبود عملکرد در هر

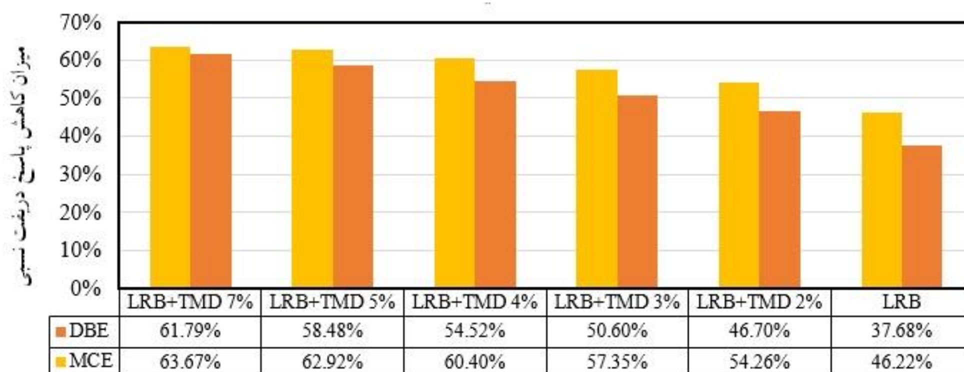
دو سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) مشاهده می‌شود، به طوری که استفاده از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز در تمامی حالت‌ها به بهبود پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی در سازه کنترل شده کمک می‌کند که این بهبود پاسخ و بهبود سطح عملکرد لرزه‌ای در نسبت جابه‌جایی نسبی با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تأثیر بیشتری می‌گذارد. همان طور که در شکل‌های (۱۹ و ۱۸) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب به میزان ۲۴٪ و ۱۸٪ به ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ بیشینه نسبت جابه‌جایی نسبی (دریفت) افزوده می‌شود که این امر در اقتصادی شدن ابعاد اعضای سازه‌ای مؤثر می‌باشد.



شکل ۱۷ مقایسه دریفت نسبی طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های جرمی مختلف میراگر جرمی: الف) در زلزله سطح DBE، ب)زلزله سطح MCE



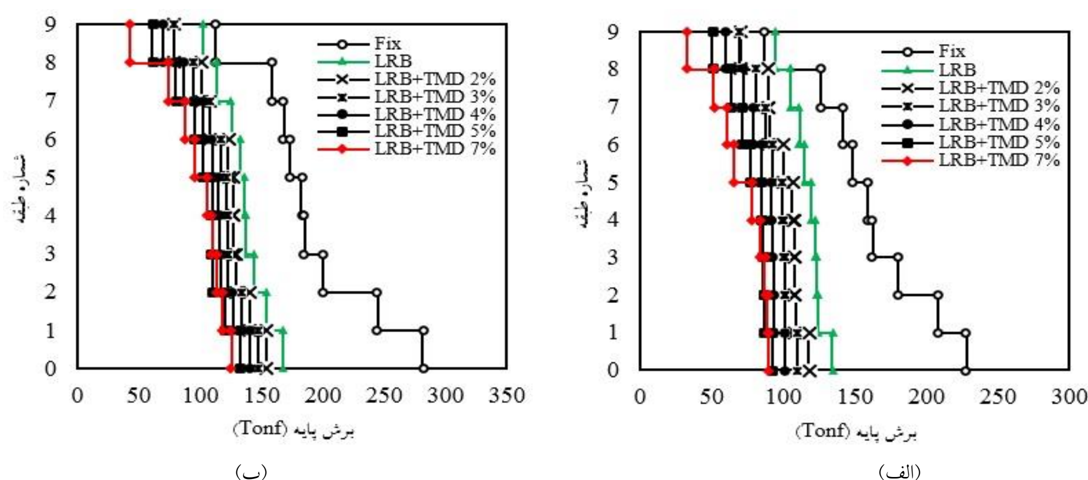
شکل ۱۸ مقایسه نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف



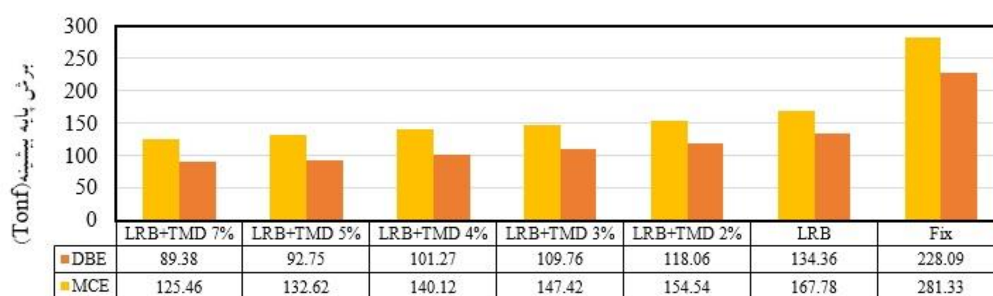
شکل ۱۹ درصد کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی بیشینه در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

برش پایه طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به مقایسه پاسخ نسبت برش پایه طبقات در حالت بدون سامانه جداساز با حالت مجهز به سامانه جداساز و حالت مجهز به سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان طور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود، برش پایه طبقات در سازه ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد و استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش بیشتر در پاسخ برش پایه طبقات می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر عملکرد سامانه کنترلی جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده در بهبود پاسخ برش پایه طبقات افزایش می‌یابد.

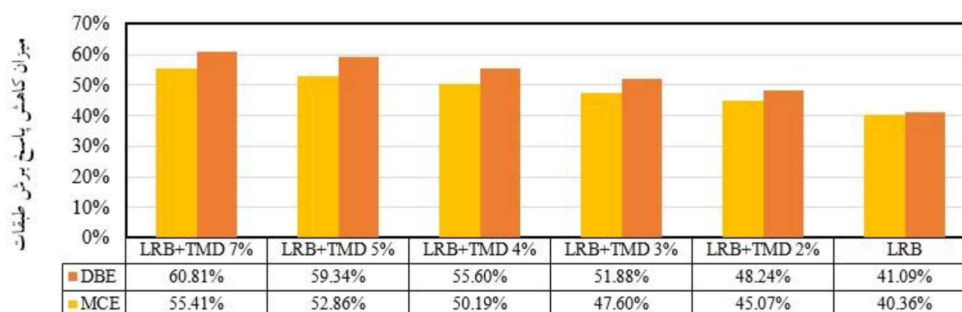
همان طور که در شکل‌های (۲۲ و ۲۱) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشنه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب به میزان ۲۰٪ و ۱۵٪ به ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ بیشینه برش پایه طبقات افزوده می‌شود که این امر در اقتصادیتر نمودن طرح مؤثر می‌باشد.



شکل ۲۰ مقایسه برش پایه طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف: الف) در زلزله سطح DBE، ب) زلزله سطح MCE



شکل ۲۱ مقایسه برش پایه طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف



شکل ۲۲ درصد کاهش پاسخ برش پایه بیشینه در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

نتیجه‌گیری

افزایش جابه‌جایی تراز جداسازی شده در سازه‌هایی که دوره تناوب آنها بیشتر می‌باشد، برخورد سازه‌های جداسازی شده را به سازه‌های کناری محتمل می‌کند، بنابراین برای رفع این اثر، طبق نتایج به دست آمده، استفاده از میراگر جرمی در تراز بام مطلوب می‌باشد. با توجه به خروجی تحلیل روش زمان دوام و مقایسه نتایج تحلیل، سامانه ترکیبی میراگر جرمی تنظیم شونده و جداساز پایه می‌تواند اثرات نامطلوب جابه‌جایی زیاد در تراز جداسازی شده را کاهش داده و در مجموع با کاهش نیاز (Demand) سازه و افزایش ظرفیت آن، در مقابل حرکت‌های زمین عملکرد مطلوبی داشته باشد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد. در ادامه نتایج این مطالعه بر روی قاب فولادی نه طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای و میراگر جرمی تنظیم شونده به‌صورت خلاصه آورده می‌شود:

۱. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز لرزه‌ای در کاهش پاسخ شتاب طبقات سازه نه‌تنها مؤثر نیست؛ بلکه با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی از کارایی سامانه کنترلی در بهبود پاسخ شتاب نسبت به حالت جداساز تنها کاسته می‌شود.

۲. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش در پاسخ جابه‌جایی طبقات، برش پایه طبقات و نسبت جابه‌جایی نسبی سازه ایزوله شده می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می‌گردد.

۳. استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده، باعث کاهش تقاضای شکل‌پذیری روسازه و سامانه جداساز می‌شود.

۴. افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش بیشینه جابه‌جایی و نیروی ایجاد شده در سطح جداساز و همچنین افزایش انرژی تلف شده توسط سامانه جداساز لرزه‌ای می‌شود که هر سه مورد جزو عوامل مطلوب در بهبود عملکرد لرزه‌ای و رفتار هیسترزیس سامانه جداساز می‌باشد.

سپاسگزاری

مراجع

1. C. Alhan and F. Şahin, “Protecting vibration-sensitive contents: An investigation of floor accelerations in seismically isolated buildings,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 1203–1226, 2011, doi: 10.1007/s10518-010-9236-0.
2. L. Wang, W. Shi, and Y. Zhou, “Adaptive-passive tuned mass damper for structural aseismic protection including soil–structure interaction,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 158, p. 107298, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107298.
3. X. Su, H. Kang, and T. Guo, “Modelling and energy transfer in the coupled nonlinear response of a 1:1 internally resonant cable system with a tuned mass damper,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 162, p. 108058, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108058.
4. H. Frahm, *Device for damping vibrations of bodies*. US Patent 089958: US Patent 089958, 1909.
5. J. Ormondroyd, “The theory of the dynamic vibration absorber,” *Trans., ASME, Appl. Mech.*, vol. 50, pp. 9–22, 1928.
6. J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, 4th editio. McGraw-Hill, NY, 1956.
7. M. Argenziano, D. Faiella, A. R. Carotenuto, E. Mele, and M. Fraldi, “Generalization of the Den Hartog model and rule-of-thumb formulas for optimal tuned mass dampers,” *J. Sound Vib.*, vol. 538, p. 117213, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2022.117213.
8. G. B. Warburton, “Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters,”

Earthq. Eng. Struct. Dyn., vol. 10, no. 3, pp. 381–401, 1982, doi: 10.1002/eqe.4290100304.

9. H. -C Tsai and G. -C Lin, “Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 22, no. 11, pp. 957–973, 1993, doi: 10.1002/eqe.4290221104.
10. C. C. Chang, “Mass dampers and their optimal designs for building vibration control,” *Eng. Struct.*, vol. 21, no. 5, pp. 454–463, 1999, doi: 10.1016/S0141-0296(97)00213-7.
11. A. M. Kaynia, D. Veneziano, and J. M. Biggs, “Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers,” *J. Struct. Div.*, vol. 107, no. 8, pp. 1465–1484, Aug. 1981, doi: 10.1061/JSDEAG.0005760.
12. Y. P. Gupta and A. R. Chandrasekharan, “Absorber System for Earthquake Excitations,” *Proceedings of the fourth world conference on earthquake engineering*. pp. B3-139, 1969.
13. R. Villaverde, “Seismic control of structures with damped resonant appendages,” *Proc. First World Conf. Struct. Control*, vol. 1, pp. 113–122, 1994.
14. T. Pinkaew, P. Lukkunaprasit, and P. Chatupote, “Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures,” *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 39–46, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00115-3.
15. F. Nateghi, “The Effect of Tuned Mass Damper on Seismic Response of Building Frames with Uncertain Structural Characteristics,” *Int. J. Eng.*, vol. 28, no. 5, pp. 662–670, 2015, [Online]. Available: https://www.ije.ir/article_72503.html
16. A. Batou and S. Adhikari, “Optimal parameters of viscoelastic tuned-mass dampers,” *J. Sound Vib.*, vol. 445, pp. 17–28, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2019.01.010.
17. J. van Til, F. Alijani, S. N. Voormeeren, and W. Lacarbonara, “Frequency domain modeling of nonlinear end stop behavior in Tuned Mass Damper systems under single- and multi-harmonic excitations,” *J. Sound Vib.*, vol. 438, pp. 139–152, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2018.09.015.
18. M. H. Stanikzai, S. Elias, V. A. Matsagar, and A. K. Jain, “Seismic response control of base-isolated buildings using tuned mass damper,” *Aust. J. Struct. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 310–321, Jan. 2020, doi: 10.1080/13287982.2019.1635307.
19. L. Wang, S. Nagarajaiah, W. Shi, and Y. Zhou, “Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper,” *Eng. Struct.*, vol. 271, p. 114963, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114963.
20. F. Yang, R. Sedaghati, and E. Esmailzadeh, “Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review,” *J. Vib. Control*, vol. 28, no. 7–8, pp. 812–836, Apr. 2022, doi: 10.1177/1077546320984305.
21. D. H. Yang, J. H. Shin, H. W. Lee, S. K. Kim, and M. K. Kwak, “Active vibration control of structure by Active Mass Damper and Multi-Modal Negative Acceleration Feedback control algorithm,” *J. Sound Vib.*, vol. 392, pp. 18–30, 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2016.12.036.
22. Y. Nakamura and K. Okada, “Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan,” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 6, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s40677-019-0123-y.
23. G. P. Warn and K. L. Ryan, “A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research

Needs," *Buildings*, vol. 2, no. 3, pp. 300–325, Aug. 2012, doi: 10.3390/buildings2030300.

24. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *"Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings(FEMA 356)."* Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.
25. H. E. Estekanchi, A. Vafai, and M. Sadeghazar, "Endurance time method for seismic analysis and design of structures," *Sci. Iran.*, vol. 11, no. 4, pp. 361–370, 2004.
26. H. E. Estekanchi, M. Mashayekhi, H. Vafai, G. Ahmadi, S. A. Mirfarhadi, and M. Harati, "A state-of-knowledge review on the endurance time method," *Structures*, vol. 27, pp. 2288–2299, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.07.062.
27. H. E. Estekanchi, "Endurance Time Method Website," 2020.
28. FEMA-440, "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures," *FEMA 440,Fed. Emerg. Manag. Agency*.
29. Y. M. Wu and B. Samali, "Shake table testing of a base isolated model," *Eng. Struct.*, vol. 24, no. 9, pp. 1203–1215, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00054-8.
30. Standard No.2800, *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*, 4thedition ed. Tehran, Iran.: Building and Housing Research Centre, 2015.
31. AISC Committee, *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16)*. Chicago-Illinois: American Institute of Steel Construction, 2016.
32. R. L. Mayes, "Design of Structures with Seismic Isolation," in *The Seismic Design Handbook*, F. Naeim, Ed., 2nd ed.Boston, MA: Springer US, pp. 723–755, 2001. doi: 10.1007/978-1-4615-1693-4.
33. S.Y. Kim and C.-H. Lee, "Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected to white-noise base acceleration considering practical configurations," *Eng. Struct.*, vol. 171, no. June, pp. 516–528, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.002.